Elektrische Maschinen Fahrplan 2020

Bericht

RECHTLICHER HINWEIS: Übersetzungen von Materialien in andere Sprachen als Englisch sind lediglich als Hilfestellung für Personen gedacht, die der englischen Sprache nicht mächtig sind, und sind rechtlich nicht bindend. Wir sind bestrebt, eine genaue Übersetzung des englischen Originaltexts bereitzustellen, aber aufgrund von sprachlichen Nuancen bei der Übersetzung in eine Fremdsprache können geringfügige Unterschiede bestehen. Diese Übersetzung wird Ihnen unter der Voraussetzung, dass Sie diesen rechtlichen Hinweis zur Kenntnis genommen haben, zur Verfügung gestellt. Das APC haftet nicht für die Verwendung der Übersetzung durch Sie oder einen Dritten, falls sich herausstellen sollte, dass die Übersetzung Mängel aufweist.

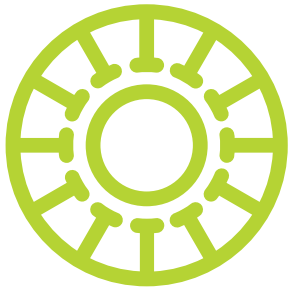
automotive council UK

ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Überblick: Elektrische Maschinen

Die Nachfrage nach Elektromotoren nimmt deutlich zu. Es wird erwartet, dass bis 2022* weltweit mehr als 500 Modelle von Elektrofahrzeugen auf den Markt kommen und bis 2025 etwa 8,5 Millionen Elektrofahrzeuge weltweit verkauft werden. In der EU sind die Verkaufszahlen von Elektroautos bereits gleichauf mit denen von Dieselfahrzeugen.

- Zu den Herausforderungen bei der Entwicklung elektrischer Maschinen gehören die Leistungssteigerung (insbesondere der Leistung pro Volumeneinheit), die Kostensenkung für die Einführung auf dem Massenmarkt, die Verringerung der Abhängigkeit von Werkstoffen, deren langfristige Verfügbarkeit nicht gesichert ist, und die Verringerung der Auswirkungen der Fertigung und des Recyclings auf die Umwelt am Ende der Lebensdauer.
- Durch innovative und effizientere Funktionsarchitekturen innerhalb einer Antriebseinheit können bessere Systemleistungen erzielt werden.
- Zunehmend kompaktere Bauweisen erfordern neue Werkstoffe und Thermomanagementstrategien, um die hohen Anforderungen an die elektrische und thermische Isolierung auf kleinstem Raum zu erfüllen.
- Werkstoffe werden in vielen Bereichen weiterentwickelt. Neue Formfaktoren und Legierungsverfahren können die Leistungen von Kupferwicklungen steigern, während fortschrittliche Nanomaterialien auf lange Sicht einen entscheidenden Leistungssprung ermöglichen können. Die Abhängigkeit von schweren Seltenerdwerkstoffen für Dauermagnete muss verringert werden. Durch den zunehmenden Rezyklatanteil, die verstärkte Verwendung von sekundären Seltenerdwerkstoffen und alternative Fertigungsmethoden wie die Polymerbindung bieten sich neue Chancen. Langfristig besteht die Möglichkeit, Elektrobänder durch Innovationen wie maßgeschneiderte amorphe Metalle zu optimieren. Weichmagnetische Verbundwerkstoffe könnten sich im Automobilbereich durchsetzen, wenn es gelingt, die Werkstoffe zu optimieren und die Herstellungskosten deutlich zu senken.
- Bei der Verringerung von Maschinenverlusten spielen Wicklungen eine zentrale Rolle. Alternative Wickellösungen und vorgeformte oder 3D-gedruckte Wicklungen könnten die Leistung verbessern. Für Rotoren und Statoren sind ebenfalls neue Herstellungsverfahren erforderlich, um die Materialausbeute zu verbessern.
- Mit Blick auf die Umweltauswirkungen ist es eine echte Herausforderung, elektrische Maschinen wirtschaftlich und mit minimaler Umweltbelastung zu recyceln. Eine geringere Abhängigkeit von Nassverfahren, z. B. bei der Motormontage, könnte zu einer besseren Effizienz der Fertigung führen und das Recycling erleichtern. Auf kurze Sicht werden die Aspekte Demontage und Recycling immer wichtiger werden, wenngleich sie angesichts der zunehmenden Integration und Kompaktheit von Konstruktionen eine Herausforderung darstellen. Auf lange Sicht gilt es, die Energieintensität vieler Fertigungsverfahren gezielt anzugehen. Die Ökobilanz entlang der gesamten Wertschöpfungskette wird dabei maßgeblich sein.



Bloomberg BNEF, Electric Vehicle Outlook 2020.

Ein vollständiges Glossar ist am Ende dieses Berichts zu finden.

Vorwort und Danksagungen

Das Advanced Propulsion Centre UK (im Folgenden „APC“) möchte sich für die umfangreiche Unterstützung durch Industrie und Wissenschaft bei der Ausarbeitung und Veröffentlichung dieses Fahrplans bedanken.

Wir bedanken uns beim Automotive Council für das Vertrauen, das er uns bei der Überarbeitung der Produkt- und Technologiefahrpläne entgegengebracht hat, sowie für die kontinuierliche Unterstützung.

Dieses Vorhaben wurde ferner maßgeblich vom Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, im Folgenden „BEIS“) unterstützt.

Neville Jackson
Im Namen des
UK Automotive Council

Ich freue mich, Ihnen den Technologiefahrplan 2020 für Antriebstechnik in der Automobilindustrie vorstellen zu können, den das Advanced Propulsion Centre (im Folgenden „APC“) in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt hat. In diesen Fahrplänen werden entscheidende Ziele für die Zukunft und die vielversprechendsten Wege zu einem CO_2-freien und nachhaltigeren künftigen Fuhrpark aufgezeigt. Sie sind ein wesentliches Instrument für die Entwicklung einer gezielten FuE-Agenda, die insbesondere für gemeinsame Innovationen relevant ist.

Die Fahrpläne, die auf den Grundlagen der vorherigen Fahrpläne des UK Automotive Council aufbauen, wurden vom APC im Jahr 2017 ausgearbeitet. Sie wurden auf den neuesten Stand gebracht, um zu verdeutlichen, wie dringend das Ziel des Vereinigten Königreichs, bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen, angegangen werden muss. Der Wandel im Bereich der Antriebstechnologien wurde in den letzten Jahren erheblich beschleunigt: Die Verbreitung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb nimmt zu, die Preise für Batterien sind schneller gesunken als zunächst angenommen, alternative CO_2-freie Technologien wie Brennstoffzellen kommen in einer beeindruckenden Geschwindigkeit zur Marktreife und saubere Kraftstoffe, unter anderem Wasserstoff, sind auf dem Vormarsch, um derzeitige fossile Kraftstoffe zu ersetzen.

Dabei gilt es allerdings große Herausforderungen zu bewältigen, da der Wandel noch schneller vonstattengehen muss. Voraussetzung dafür ist eine intensivere Forschung und Entwicklung sowie die Kommerzialisierung, wodurch erschwingliche Produkte auf den Markt gebracht werden, die für Verbraucher noch attraktiver sind. Die Technologiefahrpläne 2020 beruhen auf Umfragen unter Branchenexperten und Panels und liefern einen konsolidierten Überblick über zukünftige Ziele, Technologien und Zeithorizonte für Automobilantriebe.

Mit dem Bericht bieten wir der Automobilindustrie Erkenntnisse und eine gemeinsame technologische Ausrichtung, um die Entwicklung und Bereitstellung erstklassiger Lösungen zu beschleunigen. Die Fahrpläne stellen eine wichtige Informationsquelle dar, wenn es darum geht, gemeinsame FuE-Möglichkeiten zu erschließen, um die künftigen Herausforderungen in den Bereichen Mobilität, Gütertransport und Forschung und Entwicklung von nicht für den Straßenverkehr bestimmten Fahrzeugen anzugehen.

Prof. Barrie Mecrow
Universität Newcastle
APC Spoke for Electric Machines

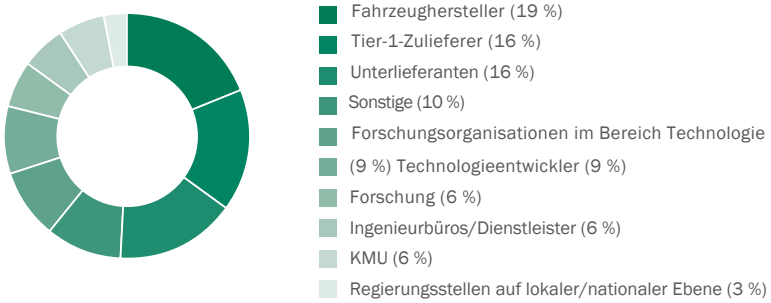
Beim Wandel hin zu Elektroantrieben beobachten wir tief greifende und sehr schnelle Veränderungen in der Automobilindustrie. Wir wollen sicherstellen, dass das Vereinigte Königreich weiterhin an der Spitze der elektrischen Revolution steht, indem wir einen ehrgeizigen, aber realistischen Weg und Ziele für elektrische Antriebsmotoren vorgeben. Der Fahrplan des UK Automotive Council, an dessen Ausarbeitung der E-Machines Spoke (Zentrum für Branchenexperten im Bereich der elektrischen Antriebstechnologie) beteiligt war, fasst Beiträge von vielen bedeutenden Akteuren aus der Industrie und Wirtschaft zusammen. Er unterstützt uns dabei, die Ziele der Regierung, bis 2030, ausschließlich neue Pkw mit Elektroantrieb auf dem Markt zuzulassen, zu erreichen.

Um auf internationaler Ebene eine Führungsposition einzunehmen, muss das Vereinigte Königreich sowohl im Bereich elektrische Maschinen als auch im Bereich Fertigungstechnologien innovative Entwicklungen hervorbringen und dabei das Kompetenzpotenzial bestmöglich ausschöpfen.

Erkenntnisse aus der Online-Umfrage unter Branchenexperten 2020

Zentrale Herausforderungen für die Branche sind die hohe Abhängigkeit von Magnetlieferungen aus China, die steigende Nachfrage nach der Integration von Antriebsstrangkomponenten sowie Aspekte der Ökobilanz.

An der im September 2020 durchgeführten Online-Umfrage nahmen zahlreiche Branchenexperten teil:



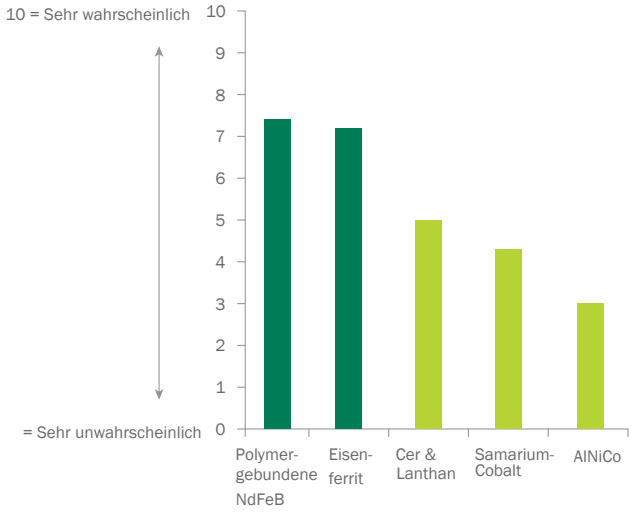
Die drei wichtigsten Themen der Experten

1 Die Abhängigkeit von Magnetlieferungen aus China führt zu Preisschwankungen für den Markt und zu Problemen mit der Versorgungssicherheit.

2 Kompakte, kostengünstige Konstruktionen sorgen dafür, dass elektrische Maschinen und die Leistungselektronik vermehrt in Antriebsstrangkomponenten zum Einsatz kommen. Hieraus ergeben sich Herausforderungen für den Nutzeffekt, die Demontage und das energieeffiziente Recycling am Ende der Lebensdauer.

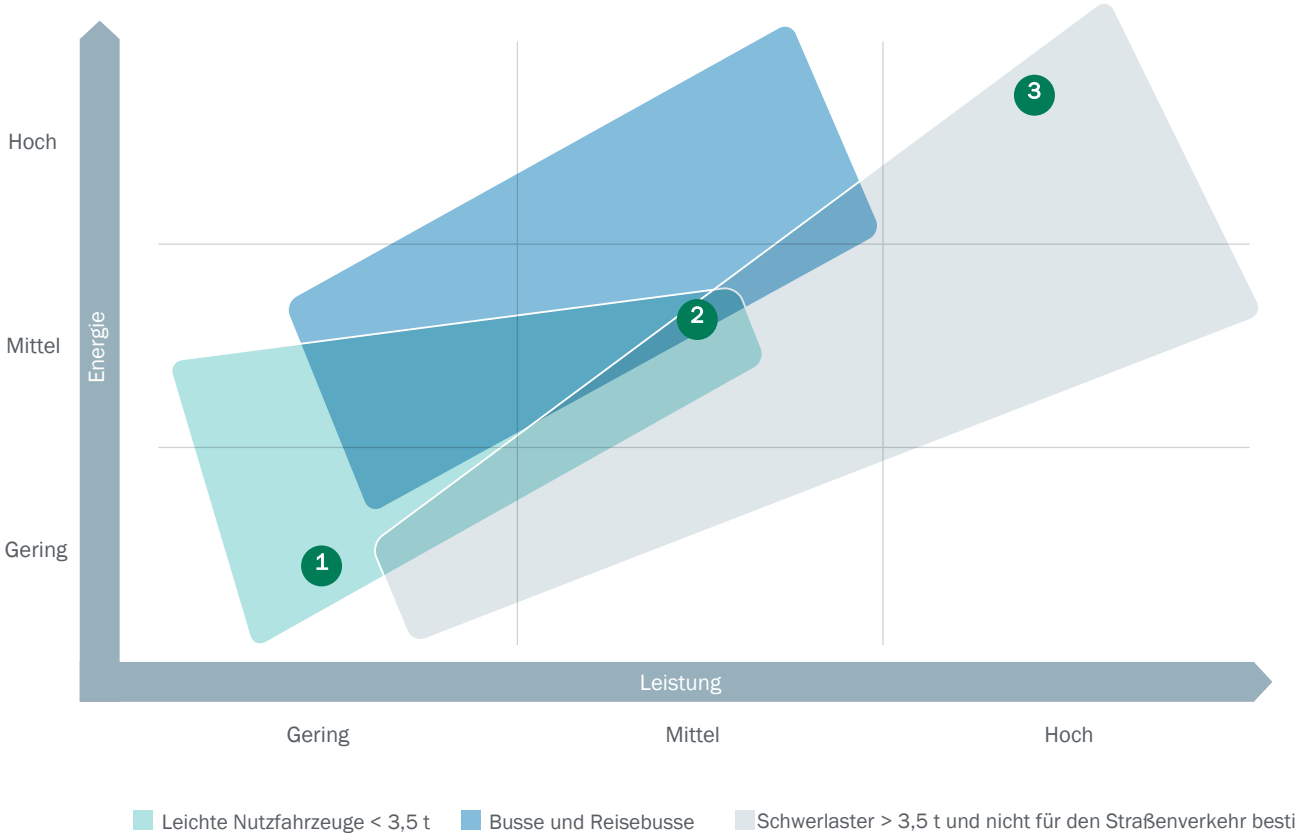
3 Umweltaspekte der Rohstoffgewinnung und -veredelung, die energieeffiziente Herstellung und die Ökobilanz am Ende des Lebenszyklus müssen stärker in den Vordergrund rücken.

Ergebnisse der Umfrage: Neben gesinterten NdFeB-Magneten werden am ehesten magnetisierbare Werkstoffe in Elektrofahrzeugen eingesetzt



Energie- und Leistungsspektrum bei verschiedenen Anwendungen

Antriebssysteme sind je nach Einsatzgebiet und Arbeitszyklus auf spezifische Leistungs- und Energieanforderungen ausgelegt. Die folgende Grafik bietet einen Überblick über die wichtigsten Massenprodukte.



Der Fahrplan 2020 liefert Werte für (1) Indikatoren für Kosteneffizienz und hohe Stückzahlen.

Werte für (2) Anwendungen mit hoher Leistungsdichte und (3) energieintensive Ultra-Hochleistungsanwendungen werden zeitnah mit der Industrie entwickelt.

1. **Kostengünstig, hohe Stückzahlen:**
   Für diese Produkte müssen Skaleneffekte bei niedrigen Kosten erreicht werden. Zu den Anwendungen gehören große Personenkraftwagen und Lieferwagen (überwiegend 400 V).
2. **Hohe Leistungsdichte:**
   Es sind hohe Leistungsdichten erforderlich, wobei der Kostenfaktor weniger entscheidend ist. Anwendungen umfassen leistungsstarke Personenkraftwagen, Busse und einige mittelschwere Nutzfahrzeuge (überwiegend 800 V).
3. **Energieintensiv und ultra hohe Leistung:**
   Für diese Anwendungen sind hohe Leistungsdichten und Zuverlässigkeit erforderlich, aber Effizienz spielt bei der maximalen Nutzung der Energie auch eine wichtige Rolle. Die Anwendungen umfassen 44-Tonnen-Lkw und große, nicht für den Straßenverkehr bestimmte Fahrzeuge (700–1200 V).

Technologiekennzahlen für kosteneffiziente Massenanwendungen

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2035
Kennzahlen für elektrische Maschinen	Kosten (USD/kW)	6	4,8	3,3
	Volumetrische Leistungsdichte (kW/l)	8	25	30
	Gravimetrische Leistungsdichte (kW/kg)	4	8	10
	WLTP-Wert für den Leistungsdurchschnitt	93 %	95 %	97 %

In der folgenden Tabelle sind die für den Fahrplan herangezogenen Vorgaben aufgeführt. Diese dienen nur als Referenz und stellen keine Zielvorgaben dar.

Vorgaben für elektrische Maschinen	2020	2025	2035
Spitzenleistung	100 kW	100 kW	100 kW
Dauerleistung	50 kW	50 kW	70 kW
Eingangsspannung (nominal)	400 V	400 V	800 V
Ausgangsstrom (max.)	450 A (rms)	450 A (rms)	225 A (rms)
Kühlmitteleintrittstemperatur	65 °C	65 °C	65 °C
Produktionsmenge	> 100 000	> 100 000	> 200 000

Anmerkungen:

- Die oben genannten Kennzahlen für elektrische Maschinen beziehen sich auf ❶ **kostengünstige** Anwendungen **mit hohen Stückzahlen**. Weitere Kennzahlen für andere Produktanwendungen finden Sie auf Seite 1.
- Der Kennzahlenwert für Kosten stellt den Preis dar, den ein Erstausrüster (OEM) für eine kostengünstige, in großen Stückzahlen hergestellte elektrische Maschine voraussichtlich zahlen würde.
- Alle Massen- und Volumenangaben umfassen die aktiven elektromagnetischen Komponenten des Motors, der Welle, des Gehäuses und eventueller Kühlkörper. Die Massen der Kühlflüssigkeit, des externen Kühlers oder der Flüssigkeitspumpe sollten nicht einbezogen werden. Elektrische Filter und Leistungselektronikkomponenten sollten nicht einbezogen werden.
- Die Dauerleistung und das Drehmoment sollten mindestens 15 Minuten lang aufrechterhalten werden können.
- Die Leistung ist die Nutzleistung, wie in der Norm ECE-R85 festgelegt.
- Der WLTP-Wert für den Leistungsdurchschnitt bezieht sich auf die Antriebsstrangeffizienz. Dies ist so zu verstehen, dass der Motor, der Wechselrichter und das Getriebe die für 2025 und 2035 angegebenen Leistungswerte erreichen.

Technologiekennzahlen
Im Jahr 2020 ersetzen sie die Ziele in den Fahrplänen und geben eine Stoßrichtung und einen Ansatz zur Messung der Best-in-class-Leistung für diese Technologie vor.

Technologiekennzahlen für kosteneffiziente Massenanwendungen

Technologiekennzahlen, die die Industrie in einem wettbewerbsorientierten Massenmarkt wahrscheinlich erreichen wird. Sämtliche Kosten- und Leistungskennzahlen sind ehrgeizig, ihnen liegt jedoch die gleiche Technologie zugrunde.

		2020	2025	2035
Kennzahlen für elektrische Maschinen	Kosten (USD/kW)	6	4,8	3,3
	Volumetrische Leistungsdichte (kW/l)	8	25	30
	Gravimetrische Leistungsdichte (kW/kg)	4	8	10
	WLTP-Wert für den Leistungsdurchschnitt	93 %	95 %	97 %

Die Kennzahlen für 2020 decken sich mit den Erfahrungen der Industrie in Bezug auf die besten Zahlen für kosteneffiziente Massenanwendungen.

Kosten: Durch Skaleneffekte sind erhebliche Kosteneinsparungen möglich. Für die hier genannten Ziele ist eine Kosteneinsparung maßgeblich, um dazu beizutragen, dass sich Elektrofahrzeuge nachhaltig auf dem Markt etablieren.

Die **Leistungsdichte** ist von Bedeutung für Gewichtsreduktion und kompaktere Konstruktionen.

Effizienz: Das WLTP-Messverfahren stellt eine einheitliche und kohärente Methode zur Bewertung von Effizienzsteigerungen für Elektromotoren in Fahrzeugen dar. Die Effizienz elektrischer Maschinen ist zwar hoch, aber es gibt noch Raum für weitere Verbesserungen, zum Beispiel in Bezug auf die Verringerung von Verlusten.

In der folgenden Tabelle sind die für den Fahrplan herangezogenen Vorgaben aufgeführt. Diese dienen nur als Referenz und stellen keine Zielvorgaben dar

Vorgaben für elektrische Maschinen	2020	2025	2035
Spitzenleistung	100 kW	100 kW	100 kW
Dauerleistung	50 kW	50 kW	70 kW
Eingangsspannung (nominal)	400 V	400 V	800 V
Ausgangsstrom (max.)	450 A (rms)	450 A (rms)	225 A (rms)
Kühlmitteleintrittstemperatur	65 °C	65 °C	65 °C
Produktionsmenge	> 100 000	> 100 000	> 200 000

Anmerkungen:

- Die oben genannten Kennzahlen für elektrische Maschinen beziehen sich auf ❶ **kostengünstige** Anwendungen **mit hohen Stückzahlen**. Weitere Kennzahlen für andere Produktanwendungen finden Sie auf Seite 1.
- Der Kennzahlenwert für Kosten stellt den Preis dar, den ein Erstausrüster (OEM) für eine kostengünstige, in großen Stückzahlen hergestellte elektrische Maschine voraussichtlich zahlen würde.
- Alle Massen- und Volumenangaben umfassen die aktiven elektromagnetischen Komponenten des Motors, der Welle, des Gehäuses und eventueller Kühlkörper. Die Massen der Kühlflüssigkeit, des externen Kühlers oder der Flüssigkeitspumpe sollten nicht einbezogen werden. Elektrische Filter und Leistungselektronikkomponenten sollten nicht einbezogen werden.
- Die Dauerleistung und das Drehmoment sollten mindestens 15 Minuten lang aufrechterhalten werden können.
- Die Leistung ist die Nutzleistung, wie in der Norm ECE-R85 festgelegt.
- Der WLTP-Wert für den Leistungsdurchschnitt bezieht sich auf die Antriebsstrangeffizienz. Dies ist so zu verstehen, dass der Motor, der Wechselrichter und das Getriebe die für 2025 und 2035 angegebenen Leistungswerte erreichen.

Fahrplan 2020

Elektrische Maschinen

Technologiefahrplan

Technologiekennzahlen für die Jahre 2020–2035 finden Sie auf Seite 2.

automotive council UK

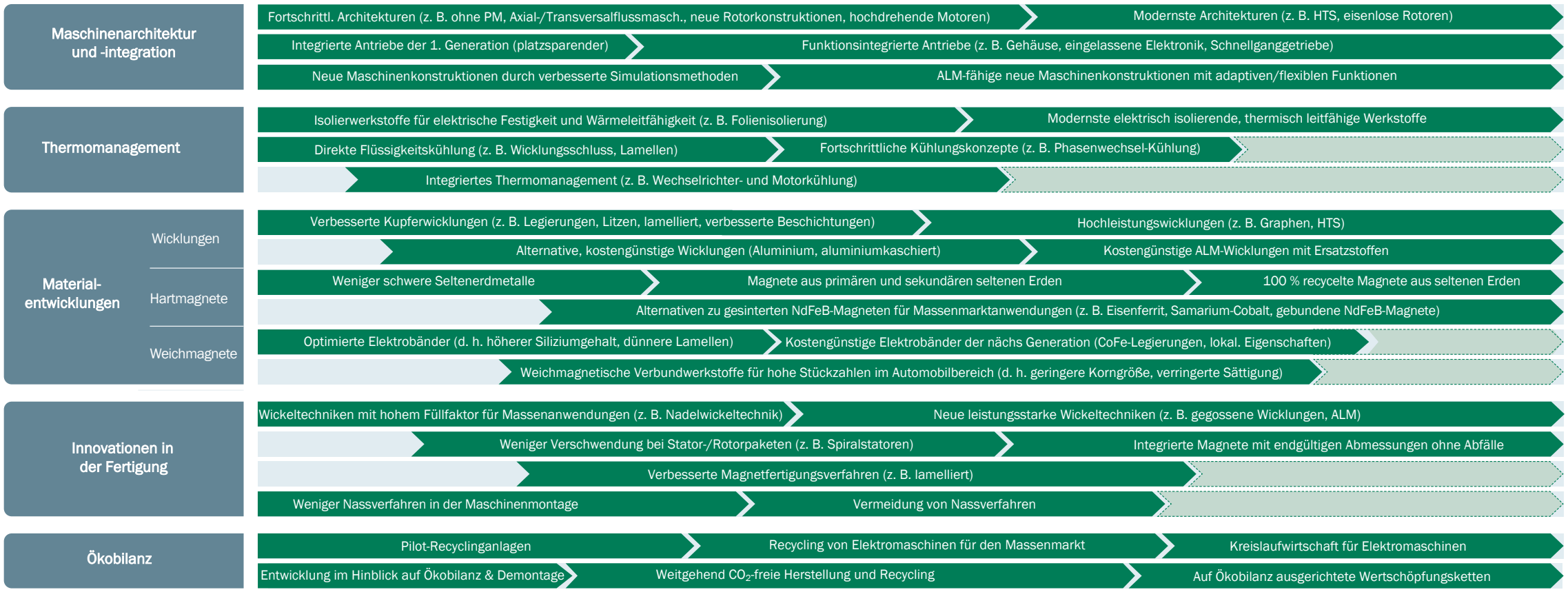
ADVANCED PROPULSION CENTRE UK

Dieser Fahrplan stellt eine Momentaufnahme der weltweiten Prognosen für Antriebstechnologien in der Automobilindustrie für den Massenmarkt dar. Anwendungsspezifische Technologien können je nach Region unterschiedlich sein.

Dunkler Balken: *Die Technologie ist auf dem Massenmarkt etabliert. In diesem Zeitrahmen werden bahnbrechende Innovationen erwartet.*

Übergang: *Ein Übergang bedeutet kein Rückzug aus dem Markt, sondern eine Neuausrichtung des FuE-Schwerpunkts.*

Balken mit gestrichelter Linie: *Marktreife: Die Technologie hat Marktreife erreicht. Sie verbleibt voraussichtlich im Massenmarkt, bis sie verdrängt wird.*



Primäre Technologiebereiche

Maschinenarchitektur und -integration

Im Bereich der **Maschinenarchitektur und -integration** zeichnen sich Innovationen in der Konstruktion elektrischer Maschinen mit Blick auf Magnetik und Mechanik ab. Diese berücksichtigen auch, wie die Innovationen besser in das Gesamtsystem des Antriebsstrangs integriert werden können. Modernste Konzepte rücken durch verbesserte Konstruktions- und Simulationswerkzeuge sowie Fertigungsmethoden in den Vordergrund.

Thermomanagement

Techniken für das **Thermomanagement** sind maßgeblich für die Entwicklung hochdrehender Maschinen mit hoher Leistungsdichte. Fortschrittliche Werkstoffe für das Thermomanagement, wie Isolier- und Imprägnierharze, sowie Strategien für die aktive Kühlung, wie Flüssigkeits- und Luftkühlung, werden hier ausführlich beschrieben.

Material-entwicklungen

- Wicklungen
- Hartmagnete
- Weichmagnete

Materialentwicklungen:

Bei den **Wickelgütern** sind zwei Entwicklungsrichtungen erkennbar, entweder kostengünstige Wickelgüter wie Aluminium oder Hochleistungsgüter, die die Leistung von Kupfer verbessern.

Hartmagnete stellen den größten Kostenfaktor in den meisten Antriebsmotoren für Elektrofahrzeuge dar, weshalb eine Kostenreduzierung durch Innovationen bei Werkstoffen, in der Lieferkette und in der Fertigung unabdingbar ist. Die Reduzierung der Abhängigkeit der Automobilindustrie von primären Seltenerdwerkstoffen und die Abkehr von gesinterten NdFeB-Magneten bietet Chancen für Innovationen.

Bei **Weichmagneten** lassen sich die parallelen Innovationen für Werkstoffe sowohl bei Elektrobändern als auch bei weichmagnetischen Verbundwerkstoffen erkennen. Elektrobänder werden zunehmend dünner, da mehr Silizium für die Leitfähigkeit hinzugefügt wird, allerdings sind bei weichmagnetischen Verbundwerkstoffen Innovationen erforderlich, damit die Technologie für den Automobilmassenmarkt tauglich wird.

Innovationen in der Fertigung

Innovationen in der Fertigung sind unverzichtbar und müssen mit verbesserten Werkstoffen einhergehen, wenn es darum geht, Lösungen für Automobilanwendungen zu skalieren. In diesem Abschnitt werden Wickeltechniken für den Massenmarkt, fortschrittliche Fertigungsverfahren für Magnete und die Vermeidung von Nassverfahren bei der Maschinenmontage thematisiert.

Ökobilanz

Die **Ökobilanz** umfasst die Kohlendioxidintensität, die Umweltauswirkungen, den Ressourcenverbrauch, die Recycelbarkeit von elektrischen Maschinen sowie deren Lieferketten. Nur wenn all diese Elemente optimiert werden, können Elektrofahrzeuge eine wirklich nachhaltige Lösung sein.

Maschinenarchitektur und -integration

Innovative Architekturen und eine verbesserte funktionale Integration ermöglichen kompakte Konstruktionen mit besserer Leistung und bieten Möglichkeiten für revolutionäre neue Materialien, Konstruktionsmethoden und Ansätze für die Fertigung.

Maschinenarchitektur und -integration

1. Fortschrittl. Architekturen (z. B. ohne PM, Axial-/Transversalflussmasch., neue Rotorkonstruktionen, hochdrehende Motoren → Modernste Architekturen (z. B. HTS, eisenlose Rotoren)
2. Integrierte Antriebe der 1. Generation (platzsparender) → Funktionsintegrierte Antriebe (z. B. Gehäuse, eingelassene Elektronik, Schnellganggetriebe)
3. Neue Maschinenkonstruktionen durch verbesserte Simulationsmethoden → ALM-fähige neue Maschinenkonstruktionen mit adaptiven/flexiblen Funktionen

Thermomanagement

Material-entwicklungen
- Wicklungen
- Hartmagnete
- Weichmagnete

Innovationen in der Fertigung

Ökobilanz

1 Fortschrittliche Architekturen

Bei der Konstruktion elektrischer Maschinen sind die Stator- und Rotorgeometrie, die Größe des Luftspalts, die Wicklungstechniken (konzentriert im Vergleich zu verteilt), der Fluss sowie der Ort und die Form der Dauermagnete von entscheidender Bedeutung.

Radialflussmaschinen sind in kostengünstigen Massenanwendungen für Elektrofahrzeuge weitverbreitet. Für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte werden auch Axialflussmaschinen verwendet. Bei diesen Architekturen werden die Spulen axial um den Stator angeordnet und der Rotor ist um 90 Grad gedreht. Dadurch entsteht ein kompakter Motor und der Bedarf an Elektrobändern für den Eisenrückschluss wird verringert. Aufgrund der geraden Flusswege können stattdessen kornorientierte Elektrobänder verwendet werden, um die Effizienz weiter zu steigern.

Für die Zukunft ergeben sich Möglichkeiten für tief greifende Veränderungen bei Stator- und Rotorarchitekturen. Ein Beispiel dafür sind Motoren, bei denen Hochtemperatur-Supraleiter, eisenlose Rotoren oder supraleitende Magnete zum Einsatz kommen.

2 Integrierte Antriebe

Um Platz zu sparen und das Gewicht zu reduzieren, werden immer häufiger integrierte Antriebe eingesetzt. Es gibt verschiedene Varianten, wobei eine Variante darin besteht, den Wechselrichter, den Motor und das Getriebe eng beieinander zu verbauen und für einen effizienten Betrieb als System zu optimieren.

Zum Erreichen höherer Leistungsdichten und einer besseren Systemeffizienz wird derzeit die Funktionsintegration elektrischer Antriebe erforscht. Bei diesen Systemen wird die Hochspannungsverkabelung entfernt, sie werden mit einem Thermomanagementsystem ausgestattet und in einem Gehäuse untergebracht. Auf lange Sicht könnten bei leistungsstärkeren und Nischenanwendungen 3D-gedruckte Antriebe zum Einsatz kommen, bei denen die Leistungselektronik in die Statoren oder Rotoren eingelassen ist.

Zu den Herausforderungen bei integrierten Antrieben gehören die Herstellbarkeit, effektive Kühlsysteme, zuverlässige Ausfallsicherungsmechanismen und das Erreichen höherer Schaltfrequenzen bei kleineren elektrischen Maschinen.

3 Verbesserte Konstruktionen durch Simulation

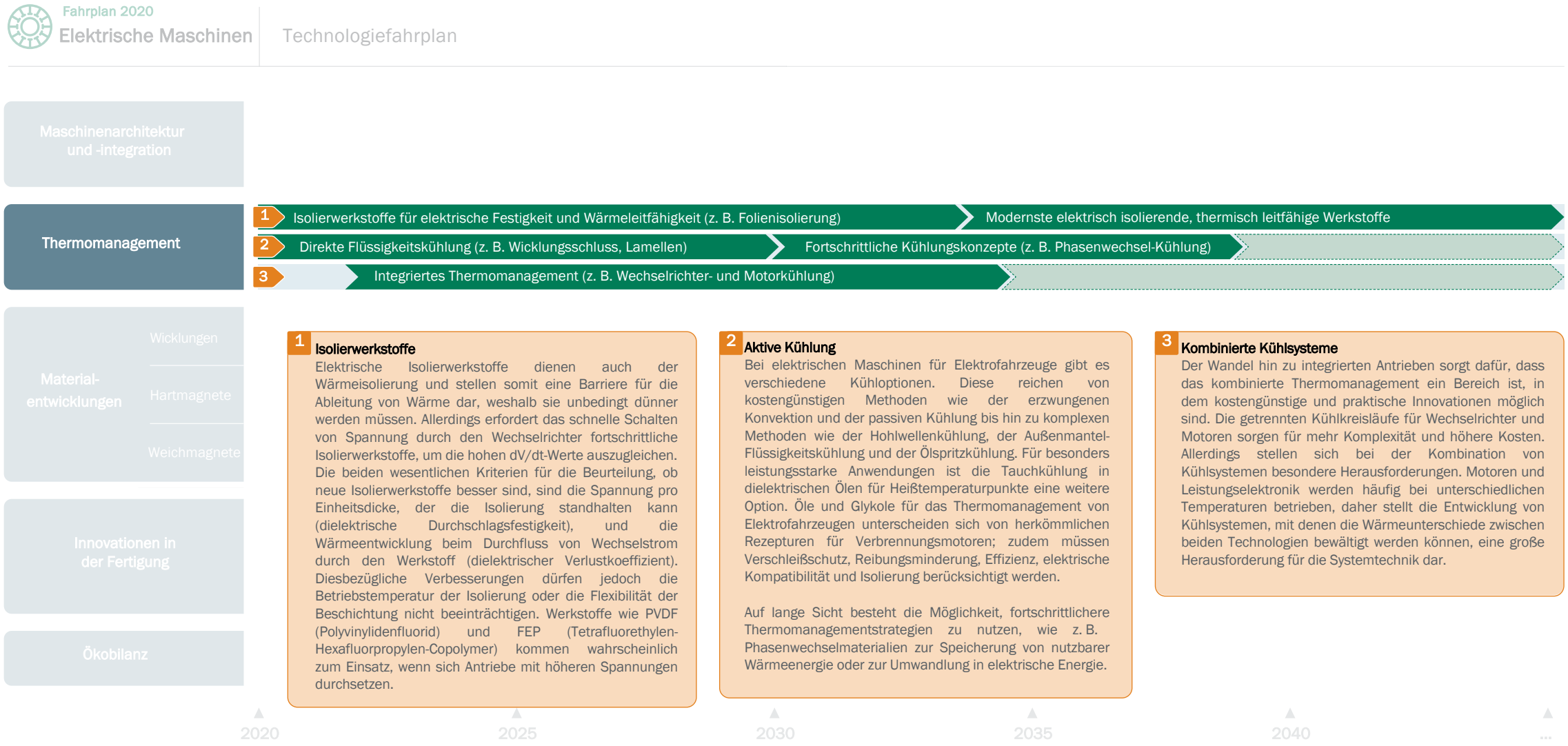
Zunehmend ausgereifte multiphysikalische Konstruktionswerkzeuge werden in Zukunft mehr Möglichkeiten für die Entwicklung neuer Topologien elektrischer Maschinen bieten. Thermische, magnetische, elektrische und mechanische Elemente können kombiniert werden, um optimale elektrische Maschinenkonstruktionen zu realisieren.

Da die additive Fertigung kosteneffizienter wird und sich immer mehr etabliert, können völlig neue Konstruktionen hergestellt werden, unter anderem durch den 3D-Druck komplexer Magnete oder Wicklungen für leistungsstarke elektrische Maschinen. Für bestimmte Anwendungen könnten sogar ganze Motoren im 3D-Druck hergestellt werden. Dadurch würden integrierte Hart- und Weichmagnete und Leistungselektronik möglich.

2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | ...

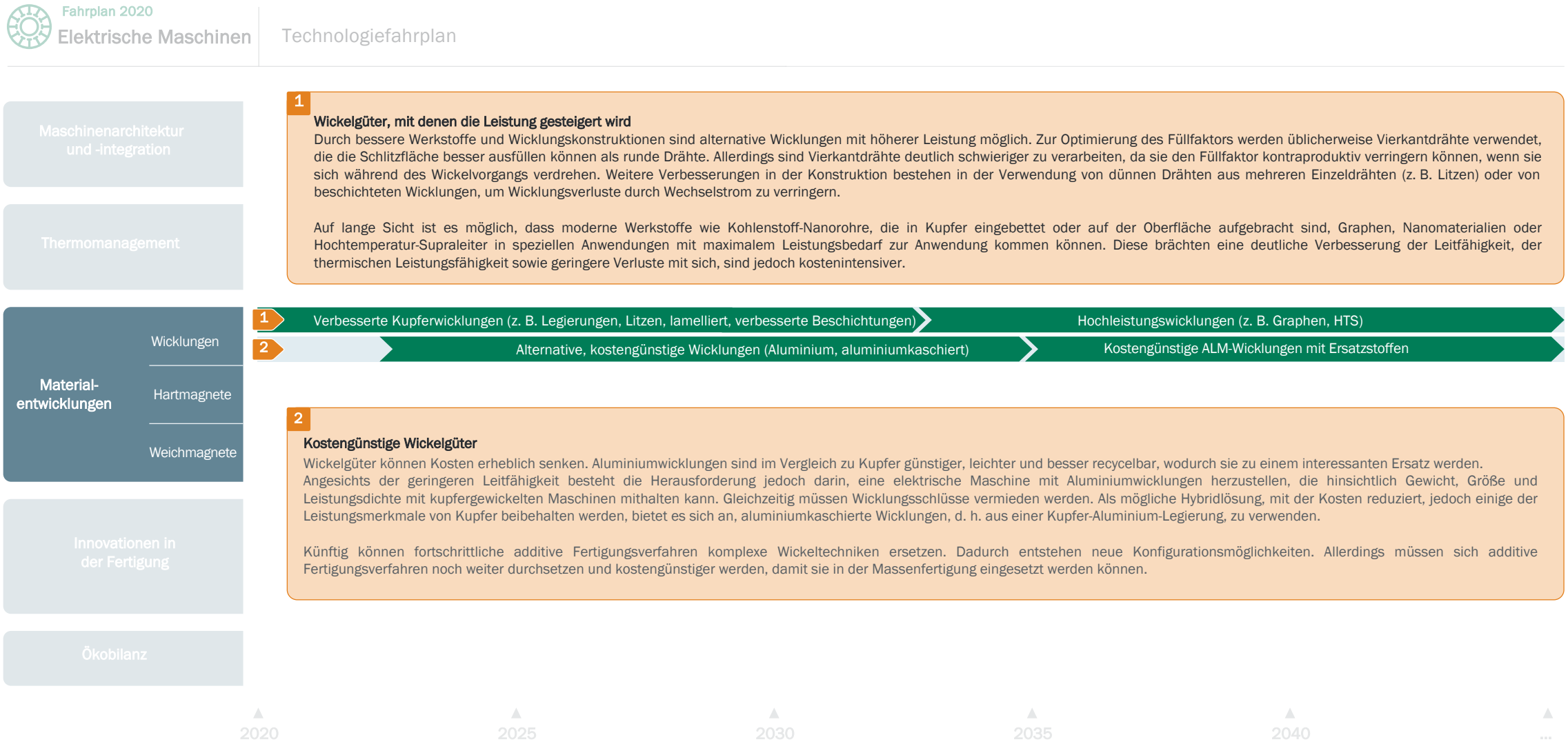
Thermomanagement

Es sind neuartige Werkstoffe und gezielte Kühlmethoden erforderlich, um die hohen Anforderungen an die elektrische und thermische Isolierung auf kleinstem Raum zu erfüllen.



Materialentwicklungen

Neue Formfaktoren und Legierungsverfahren können die Leistung von Kupferwicklungen steigern, während fortschrittliche Nanomaterialien auf lange Sicht einen entscheidenden Leistungssprung bieten können.



1

Wickelgüter, mit denen die Leistung gesteigert wird

Durch bessere Werkstoffe und Wicklungskonstruktionen sind alternative Wicklungen mit höherer Leistung möglich. Zur Optimierung des Füllfaktors werden üblicherweise Vierkantdrähte verwendet, die die Schlitzfläche besser ausfüllen können als runde Drähte. Allerdings sind Vierkantdrähte deutlich schwieriger zu verarbeiten, da sie den Füllfaktor kontraproduktiv verringern können, wenn sie sich während des Wickelvorgangs verdrehen. Weitere Verbesserungen in der Konstruktion bestehen in der Verwendung von dünnen Drähten aus mehreren Einzeldrähten (z. B. Litzen) oder von beschichteten Wicklungen, um Wicklungsverluste durch Wechselstrom zu verringern.

Auf lange Sicht ist es möglich, dass moderne Werkstoffe wie Kohlenstoff-Nanorohre, die in Kupfer eingebettet oder auf der Oberfläche aufgebracht sind, Graphen, Nanomaterialien oder Hochtemperatur-Supraleiter in speziellen Anwendungen mit maximalem Leistungsbedarf zur Anwendung kommen können. Diese brächten eine deutliche Verbesserung der Leitfähigkeit, der thermischen Leistungsfähigkeit sowie geringere Verluste mit sich, sind jedoch kostenintensiver.

2

Kostengünstige Wickelgüter

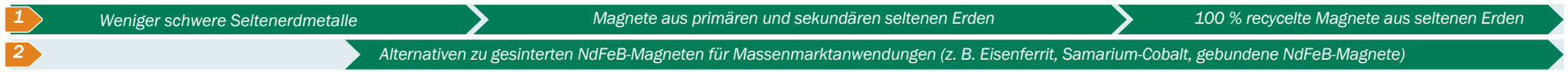
Wickelgüter können Kosten erheblich senken. Aluminiumwicklungen sind im Vergleich zu Kupfer günstiger, leichter und besser recycelbar, wodurch sie zu einem interessanten Ersatz werden. Angesichts der geringeren Leitfähigkeit besteht die Herausforderung jedoch darin, eine elektrische Maschine mit Aluminiumwicklungen herzustellen, die hinsichtlich Gewicht, Größe und Leistungsdichte mit kupfergewickelten Maschinen mithalten kann. Gleichzeitig müssen Wicklungsschlüsse vermieden werden. Als mögliche Hybridlösung, mit der Kosten reduziert, jedoch einige der Leistungsmerkmale von Kupfer beibehalten werden, bietet es sich an, aluminiumkaschierte Wicklungen, d. h. aus einer Kupfer-Aluminium-Legierung, zu verwenden.

Künftig können fortschrittliche additive Fertigungsverfahren komplexe Wickeltechniken ersetzen. Dadurch entstehen neue Konfigurationsmöglichkeiten. Allerdings müssen sich additive Fertigungsverfahren noch weiter durchsetzen und kostengünstiger werden, damit sie in der Massenfertigung eingesetzt werden können.

Materialentwicklungen

Durch die Erhöhung des Anteils an Recyclingwerkstoffen, die Verwendung von sekundären Seltenerdwerkstoffen und alternative Fertigungsmethoden wie die Polymerbindung kann die traditionelle Abhängigkeit von primären Seltenerdwerkstoffen und der damit verbundenen Herstellung von gesinterten Magneten verringert werden.

- Maschinenarchitektur und -integration
- Thermomanagement
- **Materialentwicklungen**
  - Wicklungen
  - Hartmagnete
  - Weichmagnete
- Innovationen in der Fertigung
- Ökobilanz



1

Verringerung der Abhängigkeit von rar werdenden Seltenerdwerkstoffen

Schwere Seltenerdwerkstoffe wie Dysprosium und Terbium werden eingesetzt, um die Temperaturbeständigkeit von Neodym zu verbessern. Allerdings sind diese Werkstoffe kostenintensiv und werden überwiegend aus China geliefert. Um Kosten zu sparen und Versorgungsrisiken zu verringern, sollten keine schweren Seltenerdwerkstoffe mehr verwendet werden. Auf kurze Sicht greifen einige OEMs wie Toyota auf Cer und Lanthan zurück, um möglichen Preisentwicklungen zu entgehen, oder setzen Neodym gar nicht mehr ein.

Durch die Wiederverwertung von Dauermagneten kann die Lieferkette diversifiziert werden. Mittelfristig wird nur ein Teil der wiederverwertbaren Seltenerdwerkstoffe in einer elektrischen Maschine eingesetzt werden können, und es wird eine erhebliche Menge an primären Seltenerdwerkstoffen benötigt, um die Leistung aufrechtzuerhalten. Langfristige Bestrebungen sehen daher vor, Dauermagnete ausschließlich aus Recyclingwerkstoffen herzustellen, die auch bei hohen Temperaturen und hohen Flussdichten einsetzbar sind. Somit könnte eine geschlossene Lieferkette für Seltenerdwerkstoffe geschaffen werden, wodurch die Kosten und die Umweltbelastung von Maschinen mit Dauermagneten verbessert würden, was sie langfristig zu einer Ökobilanz-konformen Option macht.

2

Alternativen zu gesinterten Magneten

Die meisten Dauermagnete in Elektrofahrzeugen – bis auf wenige Ausreißer – sind gesinterte NdFeB-Magnete. Das geistige Eigentum an diesen Herstellungsverfahren ist stark geschützt, und die Lieferkette wird von einigen wenigen Akteuren in China und Japan dominiert. Die Herstellung solch komplexer Magnete ist äußerst arbeitsintensiv und ein Teil des Legierungsmaterials geht durch die verschiedenen Schleif- und Separationstechniken verloren.

Alternative Magnetfertigungsverfahren, bei denen die Sintertechnik keine Anwendung findet, könnten sich als attraktiv für elektrische Antriebe im Automobilbereich erweisen. Kosteneffiziente Eisenferritmagnete wurden in verschiedenen Projekten der Förderorganisation für Innovation InnovateUK erprobt und im leistungsärmeren Motor des Hybridfahrzeugs Chevrolet Volt verwendet. Aufgrund der geringeren Flussdichte sind die Magnete deutlich schwerer und stellen keinen direkten Ersatz für NdFeB-Magnete dar. Samarium-Cobalt-Magnete wurden auch in Hochtemperaturmotoren mit 48 V verwendet, allerdings sind sie kostenintensiver und sie eignen sich eher für Luft- und Raumfahrtanwendungen.

Polymergebundene NdFeB-Magnete können eine weitere kostengünstige Alternative darstellen. Komplexe Formen können – teilweise sogar direkt in der elektrischen Maschine – ohne weitere Bearbeitung hergestellt werden. Ihre Lieferkette ist weniger anfällig für Preisentwicklungen, da keine Seltenerdmetalle wie Dysprosium verwendet werden, allerdings muss der Motor zur Optimierung der Leistung auf diese Magnete ausgelegt sein. Bei polymergebundenen NdFeB-Magneten besteht eine Herausforderung darin, NdFeB-Magnete Ökobilanz-konform wiederzuverwerten.

Materialentwicklungen

Verbesserungen der derzeit verfügbaren Elektrobänder können zu einer höheren Gesamteffizienz der Maschine führen. Weichmagnetische Verbundwerkstoffe und Elektrobänder der nächsten Generation, die mit modernsten Fertigungsmethoden hergestellt werden, versprechen eine höhere Leistungsfähigkeit.

Innovationen in der Fertigung

Alternative Wicklungstechniken und vorgeformte oder 3D-gedruckte Wicklungen können die Leistungen steigern. Zudem braucht es neue Herstellungsverfahren, um eine höhere Materialausbeute bei Statoren und Rotoren zu erzielen.

Maschinenarchitektur und -integration

Thermomanagement

Material-entwicklungen
- Wicklungen
- Hartmagnete
- Weichmagnete

Innovationen in der Fertigung

Ökobilanz

1 Wickeltechniken, mit denen Skaleneffekte erzielt werden können

Wickeltechniken (z. B. verteilt oder konzentriert) können die Leistung maßgeblich auf ein Höchstmaß steigern und Maschinenverluste verringern. Zu den wichtigsten Herausforderungen gehören die Steigerung des Materialfüllfaktors und die vollständige Automatisierung der Fertigungsverfahren, um kostengünstige Maschinen herstellen zu können. Ergänzend zu den Wickeltechniken sind bessere Imprägniertechniken (z. B. Träufeln) erforderlich, um Harzabfälle zu vermeiden, den Energieverbrauch zu senken und die Arbeitsfläche zu verringern.

Sowohl vorgeformte gegossene Wicklungen als auch durch 3D-Druck hergestellte Wicklungen können einen Leistungssprung erzeugen, der sich aus der Optimierung des Werkstoffeinsatzes und der Fähigkeit, komplexe Geometrien zu formen, ergibt.

2 Verbesserte Werkstoffeffizienz bei der Stator- und Rotorherstellung

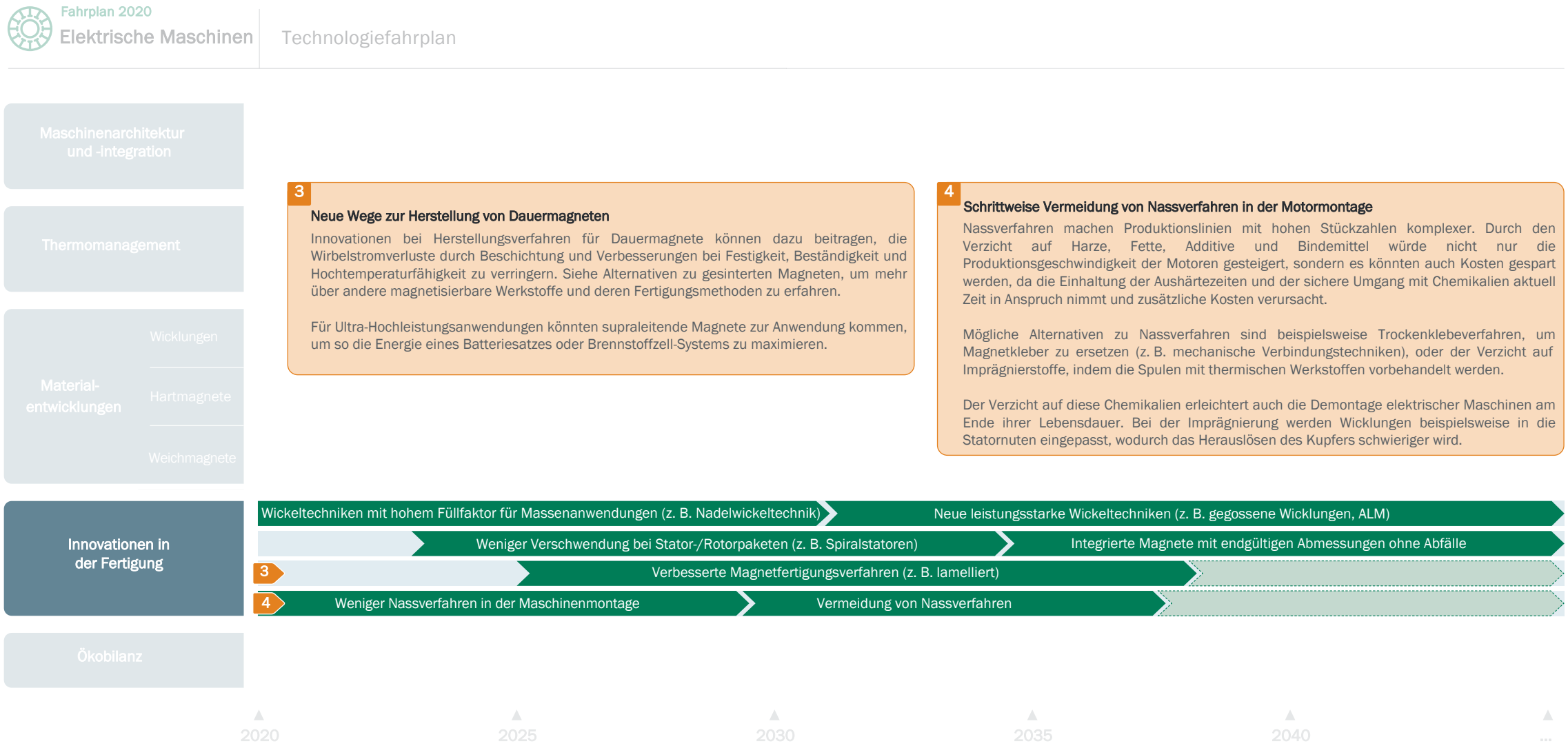
Die derzeitigen Stanzverfahren für Elektrobänder bei der Stator- und Rotorherstellung sind äußerst ineffizient, mit einer Materialausbeute von höchstens 70 %. Konstruktionen für Hybrid- oder Elektrofahrzeuge verfügen üblicherweise über 0,25–0,30 mm dicke Lamellen. Dies bringt herkömmliche Walz- und Stanzanlagen an ihre Grenzen; es kommt zu höheren Ausfallraten, einem geringeren Durchsatz und niedrigeren Erträgen. Das Laser-Schneiden könnte eine mögliche Lösung darstellen, ist jedoch kostenintensiv. Zudem können Lamellen nicht zu gleichen Stückzahlen wie beim Stanzen hergestellt werden. Daher wird das Laser-Schneiden hauptsächlich für Nischenanwendungen verwendet.

Langfristig sollen Magnete mit endgültigen Abmessungen ohne Abfälle hergestellt werden, bei denen sowohl hart- als auch weichmagnetische Werkstoffe in den Rotor oder Stator integriert werden. Dafür sind Innovationen in der Pulvermetallurgie oder der Einsatz fortschrittlicher additiver Fertigungsverfahren unabdingbar.

2020 2025 2030 2035 2040 ...

Innovationen in der Fertigung

Für Dauermagnete sind neue Fertigungsverfahren erforderlich. Eine verringerte Abhängigkeit von Nassverfahren bei der Motormontage könnte die Effizienz der Fertigung verbessern und das Recycling erleichtern.



Ökobilanz

Obwohl sich erste Lösungswege abzeichnen, ist es weiterhin schwierig, elektrische Maschinen mit minimalen Auswirkungen auf die Umwelt wirtschaftlich zu recyceln. In naher Zukunft werden Ansätze für die Demontage und das Recycling in den Vordergrund rücken. Langfristig wird die Ökobilanz über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg entscheidend sein.

- Maschinenarchitektur und -integration
- Thermomanagement
- Material-entwicklungen
  - Wicklungen
  - Hartmagnete
  - Weichmagnete
- Innovationen in der Fertigung
- **Ökobilanz**

1 Recyclingverfahren für Massenanwendungen

Mit der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen braucht es Lösungen für das Recycling von elektrischen Maschinen für Massenanwendungen. Die Herausforderung liegt dabei darin, Magnete, Kupfer und Elektrobänder kosteneffizient zu recyceln, ohne dabei die Werkstoffe zu beschädigen. Wenn Recyclingverfahren auf große Mengen hochskaliert werden, müssen dabei auch die Umweltauswirkungen auf ein Mindestmaß reduziert (keine Verwendung von schädlichen Chemikalien oder energieintensiven Verfahren) und hohe Verwertungsraten sowohl für kritische als auch nichtkritische Werkstoffe erzielt werden. Die Herausforderung für die Industrie besteht darin, all dies unter Einhaltung der Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Für das Recycling von Seltenerdmetallen werden immer mehr innovative Lösungen entwickelt. Diese reichen von der Behandlung mit Wasserstoff für das Recycling von Magneten bis hin zu Lösungsmittelextraktionsverfahren. Bei Seltenerdwerkstoffen ist es wichtig, dass die Qualität beibehalten wird: Das letztendliche Ziel ist eine vollständige Kreislaufwirtschaft ohne den Einsatz von primären Seltenerdwerkstoffen. Kupfer kann viele Male ohne Qualitätsverlust recycelt werden, obwohl es aufgrund der Imprägnierung schwierig ist, den Werkstoff zu extrahieren.

Eine wesentliche Herausforderung liegt darin, sicherzustellen, dass Elektrobänder ordnungsgemäß demontiert und recycelt werden können. Aufgrund der Isolierschichten zwischen den einzelnen Lamellen und des höheren Siliziumgehalts können Elektrobänder nicht zusammen mit herkömmlichen Stahlsorten recycelt werden. Aus diesem Grund müssen neue Verfahren für das Recycling von Elektrobändern entwickelt werden.

2 Maschinen, die unter Gesichtspunkten der Ökobilanz ohne Nettoemissionen entwickelt werden

Wenn Maschinen von Anfang an auf die Demontage ausgelegt sind und die Umweltbelastung auf ein Mindestmaß reduziert wird, erleichtert dies das Recycling erheblich. Darunter fällt die Verwendung von reversiblen Klebstoffen und Imprägnierung sowie eine einfachere Demontage der einzelnen Komponenten.

Gängige elektrische Maschinenkonstruktionen, zum Beispiel mit innenliegenden Dauermagneten, sind schwer zu recyceln, da die Magnete sich im Inneren des Rotors befinden und mit starken Klebstoffen verklebt sind. Daher sind mechanische Extraktionsverfahren ungeeignet, da die Magnete zu spröde sind und brechen könnten. Es gibt zwar Wärmebehandlungsverfahren, mit denen die Magnete für die Extraktion zugänglicher gemacht werden können, aber bei diesen Verfahren werden Dämpfe aus den erhitzten Klebstoffen freigesetzt, die umweltschädlich sind. Außerdem können die Magnete bei anhaltender Hitze unkontrollierbar vom Rotor abspringen.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Dekarbonisierung der Wertschöpfungskette elektrischer Maschinen. Verfahren für die Herstellung von Stahl, Kupfer und Magneten sind äußerst energieintensiv. Entweder müssen bei diesen Verfahren kohlenstoffarme Energiequellen zum Einsatz kommen oder alternative Herstellungsverfahren mit geringem Energiebedarf entwickelt werden.

Glossar

Abkürzung	Erläuterung
ALM	Bei der additiven Fertigung (Additive Layer Manufacturing; ALM), die ursprünglich beim Schnellprototyping eingesetzt wurde, werden dreidimensionale Teile erzeugt, indem zahlreiche zweidimensionale Schichten zusammengefügt werden. Es gibt zahlreiche Arten der additiven Fertigung, die vom 3D-Druck bis zum Elektronenstrahlschmelzen reichen.
dV/dt	Spannungsänderung in Bezug auf die Zeit.
Ökobilanz	Bewertung der Lebenszyklen. Hierbei werden die Umweltauswirkungen über alle Phasen des Lebenszyklus eines Produkts hinweg erfasst (z. B. von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung, Herstellung und Nutzung bis hin zum Recycling bzw. zur Entsorgung am Ende der Lebensdauer).
NdFeB-Magnet	Meistgenutzter Dauermagnet, der aus einer Legierung aus Neodym (seltene Erden), Eisen und Bor hergestellt wird.
SMC	Weichmagnetische Verbundwerkstoffe (Soft magnetic composites; SMC) sind ferromagnetische Pulverpartikel, die mit einer isolierenden Schicht überzogen sind und zu komplexen Geometrien geformt werden können.
WLTP	Das „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“ (weltweit harmonisiertes Prüfverfahren für leichte Nutzfahrzeuge) ist eine globale Norm zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs, der Schadstoffkonzentration und der CO_2-Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungs- und Hybridmotoren sowie der Reichweite von Fahrzeugen mit vollelektrischem Antrieb.

Ein besonderer Dank geht an Spell Creative und Mindraft für die Unterstützung bei der Gestaltung und Ausarbeitung dieses Berichts sowie an BMG Research für die Durchführung der Umfrage unter Branchenexperten für den Fahrplan im Auftrag des APC und für die Unterstützung.